



Ion radial diffusion due to non-uniform electrostatic potential in axisymmetric mirror magnetic field

著者	西丸 浩
内容記述	Thesis (Ph. D. in Science)--University of Tsukuba, (A), no. 4558, 2008.3.25 "February 2008"--Cover Includes bibliographical references (p. 103-104)
発行年	2008
URL	http://hdl.handle.net/2241/111041

氏 名 (本籍)	さいまるひろし 西 丸 浩 (福 島 県)
学 位 の 種 類	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	博 甲 第 4558 号
学位授与年月日	平成 20 年 3 月 25 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
審 査 研 究 科	数理物質科学研究科
学 位 論 文 題 目	Ion radial diffusion due to non-uniform electrostatic potential in axisymmetric mirror magnetic field (軸対称ミラー磁場中の非一様電位に起因するイオンの径方向拡散)
主 査	筑波大学教授 工学博士 今 井 剛
副 査	筑波大学教授 理学博士 中 井 直 正
副 査	筑波大学准教授 理学博士 北 條 仁 士
副 査	筑波大学准教授 理学博士 片 沼 伊佐夫

論 文 の 内 容 の 要 旨

本研究は非一様電場中のイオンの径方向拡散に関する研究を行ったものである。この研究では、非一様静電ポテンシャル中のイオンの軌道を写像方程式へ変換する事で一般化し、静電ポテンシャルの非一様性のイオン径方向拡散に及ぼす影響に関する研究を行った点が新しい。本研究によって、タンデムミラーにおけるサーマルバリアー電位形成が、サーマルバリアー部イオンの径方向拡散による可能性が初めて明らかになった。

以下に本研究で明らかになった事を列挙する。

1. 非一様電位によるイオンのドリフト運動とクーロン二対衝突に起因する新古典拡散方程式を導出した。
2. 新古典拡散とは別の新しいイオンの径方向拡散機構を発見した。
3. エンドミラー部内のイオンの拡散を一般的に考察する為の写像方程式を導出した。
4. 写像方程式を用いて拡散係数を導出した。
5. 上記拡散係数を GAMMA10 エンドミラー部に適用し、イオン径方向拡散がサーマルバリアー電位形成に重要な役割を演じている事を初めて明らかにした。

以上の事が西丸浩氏の行った研究において、非常に新しくかつ重要な研究成果である。次にそれぞれの成果について詳細に述べる。

まず非一様電位内でバウンス運動するイオンについて、径方向のドリフト運動とクーロン二対衝突に起因する新古典拡散方程式を導出した。この新古典拡散は非軸対称磁場中で発生する拡散と同類のものであり、非一様性と共鳴するエネルギーを持ったイオンが選択的に拡散していく事を明らかにした。この新古典拡散方程式は、GAMMA10 プラグ電位の非一様性が中央ミラー部を通過するイオンの径方向拡散に及ぼす影響を評価するときには非常に有効な式である。しかし GAMMA10 エンドミラー部でのサーマルバリアー電位形成の観点からは、一部の共鳴イオンのみが拡散に寄与する事により、全イオンからみた場合の拡散としてはサーマルバリアー電位形成を引き起こすほどは大きくない事が明らかになった。次に、エンドミラー部中央で軸方向座標 z に関してベキ級数展開し z^2 のオーダーまでを考慮した静電ポテンシャル内に捕捉されたイオ

ンのバウンス周波数が、イオンのエネルギーやピッチ角に依存しない事を示した。つまり一部の共鳴イオンではなく全イオンが拡散に寄与する（新古典拡散とは別の拡散）機構の存在を発見した。さらにこの拡散機構を基にして、エンドミラー部内のイオンの拡散を一般的に考察する為に、非一様静電ポテンシャルの効果を取り入れたイオンの径方向ドリフトを記述する為の写像方程式を導出した。この写像方程式はイオンの方位角方向ドリフトに径方向のドリフトシアを与える任意パラメータ α を含んでおり、 $\alpha = 2$ の時は標準写像になり、さらに $\alpha = 0$ の時にはフェルミ写像に簡約される。まず、この写像方程式を用いて準線形拡散係数を理論的に導出した。この拡散係数はイオンのエネルギーやピッチ角に依存しなく、それ故にエンドミラー部に存在する全イオンが拡散に関与する点が大きな特徴である。さらに、写像方程式を数値的に解く事で準線形の成り立つパラメータ領域を明らかにするとともに、その領域での拡散係数を決定し、理論的に導出した準線形拡散係数と比較した。本研究で導出した写像方程式は一周期不動点近傍で線形化する事によって任意の α に対して標準写像方程式に簡約される。標準写像に関する拡散は従来から良く研究が行われており、その研究をもとに考察する事で本研究の写像方程式から得られた準線形拡散係数と、数値的に決定した拡散係数と良い一致がある事を明らかにした。最後に写像方程式を現実の GAMMA10 エンドミラー部に適用した。GAMMA10 サーマルバリアー部の電位はビームプローブによって径方向二次元分布が計測されている。それによって実験的な電位の非一様性を評価する事ができる。その実験計測結果から、プラズマの径方向の閉じ込め領域内で準線形拡散が適用でき、かつ非一様静電ポテンシャルに起因したイオンの径方向輸送がイオンのクーロン衝突によるフィリング時間より短い事が分かった。以上の結果から本研究で導出したイオン径方向拡散がサーマルバリアー電位形成に重要な役割を演じている事が初めて明らかになった。

審 査 の 結 果 の 要 旨

本研究はタンデムミラー実験において、サーマルバリアー電位の形成機構を初めて明らかにした事が非常に重要な点である。タンデムミラー型核融合実験においてはプラズマの軸方向閉じ込め時間を改善する為の静電位形成が重要な研究課題である。しかしプラグ部の電子の選択的な加熱を効果的に行う為のサーマルバリアー電位は当初理論的に予想されていた機構とは異なり、プラグ電位形成に伴って自然発生的にサーマルバリアー電位が形成される事が実験的に確認されている。さらにサーマルバリアー電位に捕捉されているイオン密度は中央ミラー部イオン密度に比べて約一桁低くなっている。これらの実験事実は、サーマルバリアー部のイオンに対して大きな径方向損失の存在する事を示唆している。本研究ではサーマルバリアー部のイオンの径方向損失が、実験的に計測されているプラグ電位の非一様性に起因すると考えて、その機構の解明を行った。まず実験的に計測されているプラグ電位の非一様性を考慮した新古典拡散方程式を導出した。この方程式は非一様電位中の粒子の方位角方向ドリフトの効果を取り入れた新しいものである。しかし、計算によると、サーマルバリアー電位形成を引き起こすほどには大きなイオン径方向拡散を引き起こさない事が明らかになった。その為に次に行った事はエンドミラー部内の全イオンが拡散に寄与する機構の発見である。これは電位内を往復運動するイオンがストキャスティックな径方向拡散をする為の条件とそのときの拡散係数を導出する事が研究課題となる。この為にイオンの径方向の運動に対する写像方程式を新しく導出することで、拡散の研究を行った。その結果、GAMMA10 で計測されたプラグ電位の非一様度がサーマル電位を形成するのに充分の大きさのイオン径方向拡散を引き起こすことを明らかにした。以上の事は GAMMA10 の今後の実験に大きな貢献があるのみではなく、同様の電位閉じ込めを目指すタンデムミラーの電位形成機構にも適用でき、タンデムミラー型核融合研究の進展に大きな貢献をしたと評価される。

よって、著者は博士（理学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。